

Metodología de Calibración de Redes de Distribución de Agua Potable

Saldarriaga, Juan

Ingeniero Civil, MSc.

Profesor Titular Universidad de los Andes, Director del Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA). E-mail: jsaldarr@uniandes.edu.co.

Jurado, César Mauricio

Ingeniero Sanitario, MSc.

Investigador Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA). E-mail: c-jurado@uniandes.edu.co

XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología

Sociedad Colombiana de Ingenieros

Bogotá, D.C. 22, 23 y 24 de mayo de 2008

Resumen. La calibración de un sistema de distribución de agua potable se define como el ajuste de un conjunto de variables, a través de las cuales se busca que el modelo reproduzca de forma correcta las lecturas de campo. Las principales variables consideradas en una red típica son las Demandas Desconocidas (representan pérdidas de tipo comercial), los Emisores (pérdidas de tipo técnico), los Diámetros, las Rugosidades y las Pérdidas Menores. La cantidad de agua que ingresa y circula por los sectores de un sistema está gobernada principalmente por las Demandas Desconocidas y los Emisores. Una red que presente principalmente uno de estos problemas no puede ser calibrada mediante otro parámetro. Por otro lado, se encontró un procedimiento matemático que permite identificar la presencia de estos problemas en una red particular a partir de las mediciones de presión y caudal en un sector dado.

Palabras Clave. Calibración, simulación redes de distribución. Pérdidas técnicas, pérdidas comerciales.

1. Introducción

El aumento desproporcionado de las poblaciones y la contaminación indiscriminada de las fuentes hídricas, han provocado que el recurso agua se convierta en un bien cada día más escaso y preciado para la sociedad moderna. A pesar de que en la actualidad el hombre tiene a su disposición grandes extensiones de redes de tuberías, a través de las cuales puede satisfacer sus inmensas necesidades de líquido, además de sofisticados programas computacionales que reproducen casi a la perfección los fenómenos que al interior de éstas ocurren, en la práctica los sistemas de distribución actuales permiten que se pierda gran cantidad del agua que transportan.

Por otro lado, los modelos digitales encargados de simular el comportamiento de dichas redes, no representan con exactitud los resultados obtenidos en campo, debido a que la información contenida en éstos no es exactamente la que se encuentra en el prototipo.

El presente trabajo de investigación pretende encontrar patrones de comportamiento de las curvas de presión y caudal de redes que son sometidas a distintos fenómenos responsables de pérdidas de agua, los cuales puedan ser utilizados en la disminución del Índice de Agua no Contabilizada de sistemas reales.

2. Calibración de redes de distribución

Al interior de una red de distribución existe un conjunto de 5 parámetros (Demandas Desconocidas, Emisores, Diámetros, Rugosidades y Pérdidas Menores), los cuales gobiernan el comportamiento hidráulico de la misma. El estado concreto de cada uno de éstos sólo se conoce con exactitud durante la etapa de diseño, en donde se establecen las cantidades por defecto que cada fabricante sugiere para sus productos, se asignan valores encontrados de forma empírica y se fijan las demandas establecidas por las dotaciones esperadas para cada sector.

En el caso de las redes que ya se encuentran en funcionamiento, es imposible conocer el verdadero estado de dichas variables, por lo que es necesario realizar un proceso de ajuste a los modelos hidráulicos, para que éstos tengan la capacidad de reproducir correctamente el funcionamiento del sistema localizado en campo. Dicho proceso se conoce como calibración y es indispensable para que el modelo hidráulico de una red de distribución de agua potable sea útil en la toma de decisiones tanto en labores de operación como de mantenimiento. Dependiendo de su naturaleza, las variables que intervienen en la calibración se clasifican como hidráulicas y topológicas.

2.1. Variables hidráulicas

Reciben esta denominación porque determinan en gran medida la cantidad de agua que fluye a través de los diferentes elementos que conforman el sistema. Las variables hidráulicas se clasifican, de acuerdo con el fenómeno que las origina, en Demandas Desconocidas y en Emisores.

- **Demandas Desconocidas:** Representan la existencia de problemas de tipo comercial al interior del sistema, los cuales pueden estar asociados a conexiones ilegales, descalibración en los micromedidores instalados, errores en las mediciones o la ausencia de la misma.
- **Emisores:** Los emisores se pueden definir como dispositivos asociados a los nodos de la red, que permiten modelar el flujo de salida a través de una tubería o en un orificio descargando dicho caudal a la atmósfera. En la modelación hidráulica las fugas se consideran como Emisores. El caudal de salida por un emisor varía en función de la presión disponible en el nodo, conforme con la **Ecuación 1**.

$$Q = CP^x$$

Ecuación 1

donde C es un parámetro de entrada en unidades de L/sm, P es la presión en el nodo en m.c.a., Q el caudal en L/s, x es un exponente que depende de la ecuación de pérdidas utilizada. Comúnmente se le asigna un valor de 0.5 en la **Ecuación 1**, la cual es válida únicamente en el caso de orificios rígidos.

2.2. Variables topológicas

Conformadas por todos aquellos aspectos físicos del sistema, los cuales determinan principalmente la dirección y velocidad del flujo, así como la distribución de la energía en su interior. Las variables topológicas presentes en un sistema típico de distribución son:

- **Diámetros:** El diámetro interno de las tuberías puede llegar a variar con el paso del tiempo, debido a diversos factores tales como la aparición de biopelícula, incrustaciones, sedimentos u otros elementos que afectan su comportamiento hidráulico. La determinación en campo de su valor exacto es una labor extremadamente compleja debido, entre otros motivos, al tamaño de las redes, a que las tuberías se encuentran bajo tierra y a que los diámetros pueden variar continuamente con el paso del tiempo; por lo tanto es necesario estimar su valor durante el proceso de calibración.
- **Rugosidades:** La superficie interna de las tuberías no es totalmente lisa; en ella se encuentran pequeñas irregularidades que producen un esfuerzo cortante en sentido contrario a la dirección del flujo, el cual es el responsable de la aparición de las pérdidas por fricción. La contextura de las paredes de las tuberías, al igual que los diámetros internos, puede variar con el paso del tiempo, lo cual afecta directamente el coeficiente de fricción de las mismas. Por lo anterior, en redes de distribución en funcionamiento, el valor de éste se estima a través del proceso de calibración.
- **Pérdidas Menores:** Los accesorios y cambios de alineamiento en la tubería producen vórtices y curvaturas en las líneas de corriente, que se traducen en pérdidas de energía. Estas pérdidas son modeladas mediante un factor k_m que multiplica la cabeza de velocidad, dando así la pérdida de presión producida por el accesorio (ver Ecuación 2)

$$Q = CA\sqrt{2gH}$$

Ecuación 2

2.3. Validación de modelos

Debido al tamaño y la complejidad del espacio de búsqueda que debe ser explorado durante la calibración, es necesario llevar a cabo un proceso posterior, a través del cual se garantice que la solución obtenida tiene la capacidad de representar el sistema en cualquier condición de operación y que no se trata de una respuesta particular a las condiciones en las que fueron tomadas las mediciones.

Para realizar un proceso de validación, deben tomarse nuevas mediciones de campo, preferiblemente durante un estado de funcionamiento diferente al que se tenía en el momento de realizar las mediciones para la calibración.

3. Aproximaciones a la calibración de redes de distribución

La calibración de un sistema de distribución de agua potable no puede ser resuelta a través de métodos directos, debido a que el número de incógnitas es significativamente superior al número de ecuaciones disponibles. Por lo anterior, es necesario el uso de métodos indirectos como la búsqueda por tanteo o algoritmos más elaborados como el Metrópoli – Montecarlo, entre otros. Por otro lado, debido a que las redes reales contienen un gran número de elementos asociados, la búsqueda de soluciones puede tomar largos períodos de tiempo, llegando incluso a tardar años-máquina para obtener la mejor solución. Es por esto que se clasifica el problema en términos de complejidad computacional, como NP-Hard.

Independiente del método de aproximación utilizado, la calibración de redes de distribución debe disponer de una metodología específica encargada de establecer la forma en que opera el método empleado, lo cual influye directamente en el tiempo y la calidad de la respuesta encontrada. En el numeral 5 se trata la metodología de calibración empleada por el CIACUA, en la cual se han alcanzado resultados muy satisfactorios en las redes en que se ha implementado.

4. Agua no contabilizada en redes de distribución

Agua no contabilizada es la diferencia entre el volumen de líquido producido en las plantas potabilizadoras y el registrado durante el proceso de facturación. Además del impacto ambiental que produce, el agua no contabilizada representa un enorme problema financiero para las empresas prestadoras del servicio de agua potable, debido a los costos de captación, tratamiento y transporte, en los que se incurre, por lo que su control y disminución es una labor prioritaria en la actualidad. Las pérdidas de agua en un sistema de distribución se clasifican de acuerdo con el fenómeno que las genera, en:

4.1. Pérdidas comerciales

Alrededor de este término se agrupan los diferentes fenómenos que provocan que en determinados sectores de un sistema de distribución se generen demandas de agua no reportadas por los procesos de micromedición de la empresa. En términos de simulación, las pérdidas comerciales, independientes de su

naturaleza, se representan como demandas asociadas a los distintos nodos de la red; mientras que en términos de calibración se representan como Demandas Desconocidas.

Entre las principales causas que provocan la aparición de Pérdidas Comerciales, se destacan los errores en las bases de datos de las empresas. Lo anterior hace que algunos suscriptores que se encuentran conectados de forma legal al sistema no sean incluidos dentro de ninguno de los ciclos de lectura o facturación, por lo que nunca reciben un cobro por el agua que consumen. Otro tipo de fenómeno muy común, es la descalibración o el robo de los equipos utilizados para realizar las micromediciones, lo que provoca que las lecturas sean erróneas o no puedan llevarse a cabo. Finalmente, se tienen los suscriptores cuyas demandas no quedan registradas en la micromedición de la empresa debido a una manipulación intencional de los equipos de medición.

4.2. Pérdidas técnicas

Es la cantidad de agua que se pierde en un sistema de distribución por motivo de daños o imperfecciones en los diferentes elementos que la conforman. La aparición de fugas en una red obedece a la combinación de un conjunto de factores como el material, la presión de servicio, las características geotécnicas del suelo, las cargas a las cuales se encuentra sometida, la edad, las técnicas constructivas empleadas, entre otros, los cuales se conjugan de forma particular en cada caso, haciendo imprevisible el momento y el lugar en que se producen. La cantidad de agua que fluye a través de una fuga obedece casi de manera exclusiva a las características geométricas del daño y a la presión hidrostática del punto en el cual se encuentre localizada, lo que provoca que las Pérdidas Técnicas sean máximas durante las horas de menor consumo en la red.

A diferencia de las Pérdidas Comerciales, en las que el agua no reportada es aprovechada de alguna manera, el agua no contabilizada producto de las Pérdidas Técnicas se desperdicia, y representa un riesgo inminente para la estabilidad de taludes y estructuras aledañas, por lo cual su detección y reparación, es una labor de vital importancia.

5. Metodología de calibración del CIAUCA

Construida de acuerdo con criterios netamente hidráulicos, esta metodología proporciona un enfoque sistémico al problema de la calibración, clasificando las variables involucradas de acuerdo a sus principales características, tal como se presenta en la Figura 1

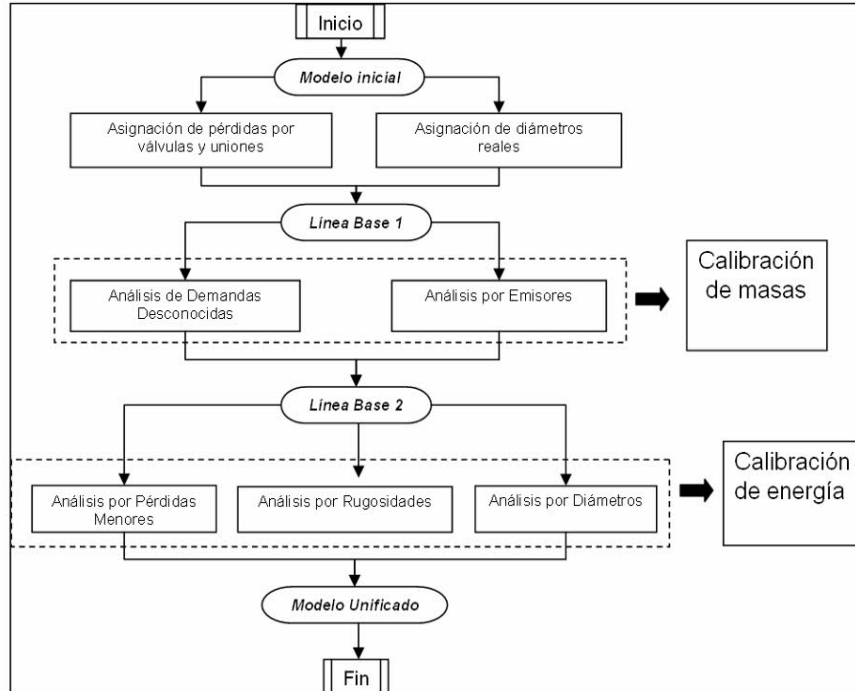


Figura 1. Metodología de calibración del CIACUA.

A continuación se presenta el significado y la importancia de cada uno de los elementos que conforman el algoritmo presentado en la Figura 1.

5.1. Modelo Inicial

Consiste en el resultado que se obtiene al procesar y convertir toda la información topológica y de consumos suministrada por la empresa prestadora del servicio de agua potable, en un modelo hidráulico digital. El Modelo Inicial no contiene pérdidas menores, ni registros de agua no contabilizada, por lo que no tiene la capacidad de reproducir adecuadamente las mediciones de presión o de caudal registradas en la red.

5.2. Línea Base 1

Este modelo se obtiene como resultado de asignar al Modelo Inicial, los diámetros internos de todas las tuberías de acuerdo con los reportes de los fabricantes; además de un conjunto de pérdidas menores por metro, por concepto de uniones.

5.3. Análisis por Demandas Desconocidas

Conjunto de escenarios construidos a partir de la modificación de la demanda base de algunos nodos de la red, a través de los cuales se busca ajustar la masa que entra y sale de la red de distribución, para comprobar el papel de las demandas en el sistema de forma global. Los escenarios probados se construyen

teniendo en cuenta algunas características de los nodos, tales como su ubicación, el estrato socioeconómico predominante y el uso que se le da al agua.

5.4. Análisis por Emisores

Conjunto de pruebas que buscan ajustar las mediciones de caudal y de presión, a través de escenarios en los que se varía exclusivamente el coeficiente de emisión de los nodos de la red. Al igual que con el análisis por Demandas Desconocidas, en el análisis por Emisores se busca establecer el papel global que éstos tienen frente al sistema. La creación de escenarios se basa en criterios hidráulicos, socioeconómicos y topológicos.

5.5. Línea Base 2

Escenario encargado de recopilar los resultados obtenidos a través de los análisis independientes por Demandas Desconocidas y Emisores. Con la Línea Base 2 se busca ajustar de forma casi definitiva las curvas de masas y tener una buena aproximación al comportamiento medido con relación a las curvas de energía.

5.6. Análisis por Diámetros

En este análisis se prueba una gran cantidad de escenarios, con los cuales se analiza el efecto que tienen sobre el sistema ligeras variaciones en los diámetros. Así mismo se trata de identificar comportamientos atípicos, posiblemente generados por errores de catastro de la red. Para la generación de los escenarios se tiene en cuenta principalmente el material y las velocidades medias de flujo.

5.7. Análisis por Rugosidades

En esta fase del proceso se prueba el efecto que tienen los cambios en la rugosidad original de las tuberías, sobre el comportamiento hidráulico del modelo. Al igual que en el Análisis por Diámetros, los escenarios del Análisis por Rugosidades, se construyen de acuerdo con el material y la velocidad de flujo de las tuberías.

5.8. Análisis por Pérdidas Menores

En éste se considera el efecto que provoca sobre la red la existencia de accesorios u otros elementos en contacto con el flujo que causan pérdidas de energía.

5.9. Modelo Unificado

Consolida en un solo modelo los resultados encontrados durante los análisis por Diámetros, Rugosidades y Pérdidas Menores. A través de éste, se busca principalmente ajustar las curvas de masa y

energía obtenidas durante la Línea Base 2. El Modelo Unificado representa el último paso de la calibración, después del cual se dispone de un modelo calibrado.

6. Caracterización del comportamiento de las curvas por Demandas Desconocidas y Emisores a través de indicadores.

Para caracterizar el comportamiento de las redes de distribución de agua potable frente a la presencia de pérdidas técnicas y comerciales se seleccionaron algunas redes de distribución de algunos municipios del país, como es el caso de Andalucía, Candelaria, Guacarí y La Cumbre (Ubicados en el departamento del Valle del Cauca), a los cuales se les agregó gran cantidad de Demandas Desconocidas y Emisores. A través de este análisis se encontró que uno de los principales aspectos que permite identificar el comportamiento de las Demandas Desconocidas, es que su presencia tiende a alargar de manera considerable la forma de las curvas, tanto de presión como de caudal con respecto al Modelo Inicial. Lo anterior hace que se presenten diferencias de presión relativamente pequeñas con respecto al Modelo Inicial, durante las horas de bajo consumo, y muy grandes durante las horas de altos consumos. Este comportamiento se debe a que las Demandas Desconocidas actúan como factores multiplicadores sobre las demandas originales del modelo.

Con respecto a las curvas de presión y de caudal obtenidas a través de problemas por Emisores, éstas tienden a conservar la forma del Modelo Inicial, debido a que las diferencias el Modelo Inicial y la serie medida, entre las horas de máximo y mínimo consumo no son muy significativas (ver Figura 2).

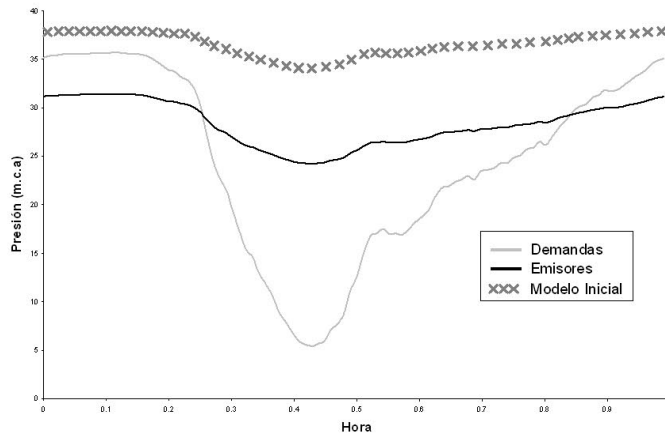


Figura 2. Curvas de presión típicas por Demandas Desconocidas y por Emisores

Con el fin de estandarizar las características mencionadas, se definieron los siguientes indicadores.

- **Media relativa:** Se define como el valor absoluto de la diferencia, entre el promedio de la serie del Modelo Inicial y el promedio de la serie del problema analizado.
- **Desviación estándar relativa:** Consiste en el valor absoluto de la diferencia, entre la desviación estándar del Modelo Inicial y la del problema analizado.

- **Presión (o caudal) máxima relativa:** Se define como el valor absoluto de la diferencia entre la presión máxima (o caudal) del Modelo Inicial y la presión máxima (o caudal) de la serie problema.

6.1. Relación entre los indicadores relativos

Una vez obtenidos los valores de los indicadores relativos planteados, se procedió a analizar la forma en la cual se relacionan, en busca de un patrón característico para el caso de las Demandas Desconocidas y otro para el caso de los Emisores, a través del cual se pueda identificar el problema predominante en una red a partir de sus mediciones de caudal y presión.

A través de este proceso se estudió la forma en la cual se relaciona la desviación estándar relativa con respecto a la media relativa, encontrando una relación lineal para aquellas curvas generadas a partir de problemas por Demandas Desconocidas. En el caso de los Emisores, se encontró una relación lineal entre la presión (o caudal) máxima relativa con respecto a la media relativa.

7. Método práctico de identificación de problemas

Después de identificado el comportamiento de los indicadores relativos de todas las curvas obtenidas a partir de Demandas Desconocidas y Emisores, el paso siguiente es definir un método que aproveche esta característica para su fácil identificación en mediciones tomadas en redes en funcionamiento.

Para utilizar esta particularidad, es necesario disponer de mediciones de campo confiables, al igual que de un modelo hidráulico que contenga información topológica completa, al que se le haya agregado los consumos reportados por las labores de micromedición.

El siguiente paso es agregar por separado Demandas Desconocidas y Emisores a algunos nodos del Modelo Inicial, para obtener a través de éste, las ecuaciones características para dichos fenómenos, en cada uno de los puntos de medición, tanto de caudal como de presión. Con las ecuaciones características y los valores de desviación estándar relativa y presión (o caudal) máxima relativa, se calcula el valor de la media relativa por Demandas Desconocidas y la media relativa por Emisores. Dichos valores deberán ser comparados con respecto a la media relativa medida. A través de esta comparación se podrá establecer el tipo de problema predominante en el sector en el que se realizaron las mediciones.

8. Aplicación en una red real

Para comprobar la eficacia del método expuesto se analizó una zona dentro del Distrito Estadio de la ciudad de Bucaramanga en la cual durante el proceso de calibración se detectó la presencia de Emisores, las cuales fueron confirmadas en campo.

Como primer paso, se plantearon algunos escenarios por Demandas Desconocidas, a través de los cuales se encontraron las curvas generadas por esta variable en el nodo encargado de representar el medidor de presión de la zona. A dichas curvas, se les calculó la media relativa y la desviación estándar relativa (ver Figura 3). Adicionalmente, se plantearon escenarios por Emisores, obteniendo un conjunto de

curvas de presión en el mismo nodo, a las cuales se les calculó la presión máxima relativa y la media relativa, obteniendo los resultados de la Figura 3.

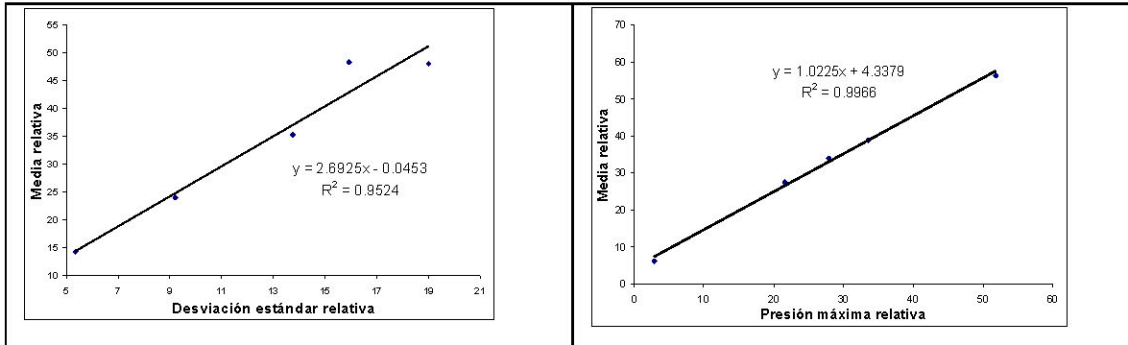


Figura 3. Resultados de las regresiones para ensayos por Demandas Desconocidas y Emisores, respectivamente.

Con las ecuación presentada en la **Figura 3** para Demandas Desconocidas y la desviación estándar relativa de la serie medida que fue de 0.1817 se encontró la media relativa por Demandas. Así mismo, con la regresión de la **Figura 3** para Emisores y la presión máxima relativa de la serie medida que fue de 84.8182 se encontró la media relativa por Emisores. Los valores de la media calculados a través de las regresiones se comparan con la media relativa medida (ver Tabla 1), de esta forma se puede relacionar la serie medida con el fenómeno que la provocó.

Tabla 1. Resultados de las regresiones por Demandas Desconocidas y por Emisores.

Media relativa medida	Media relativa Demandas Desconocidas	Media relativa Emisores	% error Demandas Desconocidas	% error Emisores
64.60	0.44	70.61	99.31	9.31

Los resultados de la Tabla 7 muestran de manera inequívoca que al interior de la zona de la red del Distrito Estadio se está presentando un problema importante de tipo técnico, el cual afecta el comportamiento de las mediciones. Dicho resultado se encontró durante el proceso de calibración; sin embargo fue necesario disponer del criterio de un grupo de ingenieros muy bien entrenados durante un largo período de tiempo para lograr esta conclusión. Queda claro que a través del método propuesto se puede llegar al mismo resultado de forma mucho más rápida.

9. Conclusiones

- La calibración de redes de distribución es un problema complejo, en el que el número de variables involucradas es superior al número de ecuaciones disponibles, por lo que no existe un método directo de solución. Debido a lo anterior y a la gran cantidad de tiempo que requiere la exploración del espacio solución, se han venido implementando un conjunto de procedimientos de aproximación, a través de los cuales se busca una respuesta coherente. Algunos de los principales métodos probados son los Algoritmos Genéticos, la Lógica Difusa, Metrópoli-Montecarlo y la exploración manual.

- Con el fin de buscar un método de identificación de pérdidas en un sistema de distribución a través de las mediciones de presión y caudal recolectadas en campo, se planteó un conjunto de indicadores estadísticos e hidráulicos, con los cuales se buscó aprovechar las características propias de las curvas por Demandas Desconocidas y Emisores. Entre los principales indicadores analizados se encontró la media y la desviación estándar, con su respectivo análisis relativo. Mediante dicho procedimiento se encontró la existencia de una relación lineal entre la media relativa y la desviación estándar relativa, para las curvas de los problemas por Demandas Desconocidas; y entre la media relativa y la presión máxima relativa para los problemas por Emisores.

- A través de estas relaciones, se planteó un método de identificación y búsqueda de pérdidas técnicas y comerciales a partir de las mediciones en campo, el cual se probó en problemas supuestos y en un sistema real, con excelentes resultados.

10. Bibliografía

- CIACUA, "Informe final del Proyecto Plano Óptimo de Presiones del Distrito Estadio de la Red de Distribución del Municipio de Bucaramanga", Bogotá, 2006.
- Saldarriaga Juan, "Hidráulica de Tuberías", McGraw-Hill, Bogotá Colombia, 2007.
- Rossman Lewis, User's manual EPANET, USA, EPA, 1999.
- CIACUA, "Informe final del proyecto Plano Óptimo de Presiones de los Municipios de Andalucía, Ansermanuevo, Bolívar, Bugalagrande, Candelaria, Ginebra, Guacarí, La Cumbre y Toro.", Bogotá, 2006.
- Sisa, Augusto. "Análisis de parámetros para la calibración de redes de tuberías con algoritmos genéticos". Tesis de maestría, Universidad de los Andes, 2003.
- Salas, Daniel. "Evaluación de métodos de inteligencia artificial para calibración de redes de acueducto". Tesis de maestría, Universidad de los Andes, 2003.